

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diagnostický systém experimentální HVAC jednotky

Autor: Bc. Ondřej Hanuš

Vedoucí práce: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

Praha, 2014

Název práce: Diagnostický systém experimentální HVAC jednotky

Autor: Bc. Ondřej Hanuš

Katedra: Katedra měření

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

E-mail vedoucího: smid@fel.cvut.cz

Anotace V této práci je popsán systém pro sběr dat z experimentální HVAC jednotky a způsob jakým budou získaná data dále využita. Jsou zde uvedeny všechny části systému, včetně senzorů a jejich parametrů. Ústředním prvkem systému je platforma Compact RIO od National Instruments s přídatnými moduly. Platforma zajišťuje vyčítání dat ze senzorů připojených přes různé periferie, zpracování naměřených dat, vizualizaci a ukládání. Nakonec je zde demonstrována, na datech získaných ze systému, funkce Fault detection and diagnostics metody a vysvětleno využití virtuálních senzorů.

Klíčová slova: HVAC, Experimentální systém, Compact RIO, Fault detection and diagnostic, FDD, virtuální senzor

Title: Diagnostic System for Experimental HVAC Unit

Author: Bc. Ondřej Hanuš

Department: Department of Measurement

Supervisor: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: smid@fel.cvut.cz

Abstract In this work the system for data collecting from experimental HVAC unit is described as well as the way how such collected data can be used. There are all components of the system described, including sensors with their parameters. The central element of the system is a platform Compact RIO by the National Instruments with additional moduls. The platform provides data from the sensors connected via various peripherals, a processing of the measured data, a visualization and a storing. In addition Fault detection and diagnostics, based on collected data from experimental HVAC unit, and usage of virtual sensors is described.

Keywords: HVAC, Experimental system, Compact RIO, Fault detection and diagnostic, FDD, virtual sensor



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Ondřej Hanuš**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Letecké a kosmické systémy**

Název tématu česky: **Diagnostický systém experimentální HVAC jednotky**

Název tématu anglicky: **Diagnostic System for Experimental HVAC Unit**

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte systém sběru dat z experimentální vzduchotechnické (HVAC) jednotky pomocí platformy NI CompactRIO pro senzory teploty, vlhkosti, tlaku, odběru energie a případné další. Obslužný software má provádět vizualizaci aktuálních hodnot a krátkodobé historie, umožňovat vzdálený přístup přes web a ukládání naměřených dat na ftp server. V další části práce vytvořte v prostředí Matlab diagnostický systém používající získaná data. Zaměřte se na detekci vybraných degradací funkce HVAC jednotky, prozkoumejte využití virtuálních senzorů.


Seznam odborné literatury:

- [1] The digital signal processing handbook. Editor Vijay K Madisetti, Douglas B Williams. Boca Raton: CRC Press LLC, 1998, 1 sv. (různé číslování). ISBN 08-493-8572-5.
- [2] Rogalewicz, V.: Stochastické procesy (Analýza časových řad). České vysoké učení technické, Praha 1993.
- [3] Davídek, V. and Sovka, P.: Číslíkové zpracování signálů a implementace. České vysoké učení technické, Praha 2002.
- [4] KREIDER, Jan F.: Heating and cooling of buildings: design for efficiency. Rev. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2010, xix, 843 s. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.). ISBN 978-1-4398-1151-1.


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 11. listopadu 2013

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2015


Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 11. 2013

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v literatuře. Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13. května 2014

Ondřej Hanuš

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Radislavu Šmídovi, Ph.D, za odborné vedení mé diplomové práce a dále Ing. Danielovi Adamovskému, Ph.D. a Ing. Vladimírovi Horynovi za jejich vstřícný přístup a příjemnou spolupráci na projektu.

OBSAH

Anotace	ii
Zadání práce	iii
1. Úvod	1
1.1. Motivace	1
1.2. Fault Detection and Diagnostics - FDD metody	3
1.3. Virtuální senzory	3
2. Popis systému	5
2.1. Blokové schéma systému	5
2.2. Klimatizační jednotka	6
2.3. Jednotka pro sběr dat	8
2.3.1. Platforma NI CompactRIO-9081	8
2.3.2. Přídavné I/O moduly	9
2.3.3. Komunikace se senzory	11
2.4. Program	13
2.4.1. FPGA Target	13
2.4.2. Vlastní Virtual Instrument	13
2.4.3. Komunikace po sběrnici M-Bus	15
2.4.4. Indexování hodnot	16
2.4.5. Vzdálený přístup	16
2.5. Použité senzory	17
2.5.1. Měření stavu vzduchu	17
2.5.2. Měření rychlosti průtoku vzduchu	17
2.5.3. Měření rozdílových tlaků	18
2.5.4. Měření spotřeby vody	19
2.5.5. Měření spotřeb energií	19
2.6. Kompletní zapojení	21
3. Měření a zpracování dat	23
3.1. Ukázka naměřených dat	23

3.2. Příklady simulovaných závad	25
3.2.1. Závada na vstupní klapce v režimu cirkulace	25
3.2.2. Ucpání přívodu vzduchu	26
3.3. Demonstrace FDD metody	26
4. Plánovaná rozšíření	31
4.1. Odhad úhlu natočení klapek	31
4.2. Měření úhlu natočení klapek	32
4.3. Měření otáček ventilátorů	32
4.4. Další možnosti rozšíření	32
5. Závěr	33
Literatura	35
Přílohy	39
A. Tabulka indexů hodnot	39
B. Kód skriptu FDD metody	41
C. Fotky experimentální HVAC jednotky	43
D. Obsah přiloženého CD	47

ÚVOD

Hlavní cílem této práce bylo vytvořit systém, který bude sbírat data z experimentální HVAC (humidity, ventilation and air condition) jednotky data s využitím platformy Compact RIO od National Instruments. Platforma Compact RIO měla být řízena programem vytvořeným v grafickém programovacím prostředí LabVIEW. Program musel být schopný sbírat data ze senzorů připojených k různým periferiím, jako jsou napěťové výstupy, proudová smyčka, sériová linka RS-485 a sběrnice M-Bus. Hlavními měřenými parametry byly teplota, relativní vlhkost vzduchu, rosný bod, rychlost proudění vzduchu, tlakové rozdíly a spotřeby energií. Dalším cílem bylo, aby byla data v programu vizualizována, s krátkodobou historií vykreslována do grafů a dlouhodobě ukládána. K uloženým datům měl být vytvořen vzdálený přístup aby mohla být dále zpracovávána a využita například pro návrhy FDD (Fault Detection and Diagnostics) metod a pro vytváření virtuálních senzorů.

1.1. Motivace

Spotřeba energie budov ve vyspělých zemích představuje asi 20 až 40 % z celkové spotřeby energie. Ve výsledku to znamená, že je spotřeba energie v budovách větší než spotřeba energie v průmyslu nebo v dopravě. Hlavním spotřebičem energie v budovách jsou právě HVAC jednotky. V kancelářských budovách dosahuje podíl celkové spotřeby energie v klimatizačních jednotkách téměř 50%, v hotelích a obchodních centrech se spotřeba energie pohybuje okolo 40% a v nemocnicích kolem okolo 30%. Z toho vyplývá, že HVAC jednotky v budovách ve vyspělých státech spotřebují 10 až 20 % celkového množství spotřebované energie [3].

Díky neustálému růstu poptávky po energii, cen energií a negativním dopadům na životní prostředí, spojeným se spotřebováváním energie, je zde snaha snižovat zatížení, které produkují HVAC jednotky. Kromě zlepšování řízení jednotek a celkovému zvyšování účinnosti, využitím nových materiálů a efektivnějších rekuperátorů, je také nutné se zaměřit na závady spo-

jené s HVAC jednotkami. HVAC jednotky, jakožto mechanická zařízení, jsou náchylná na různé druhy typických závad. Studie testující 123 střešních jednotek ukázala, že 64% z nich mělo nějakou závadu v oblasti rekuperátoru[8]. Takovéto závady zůstávají většinou skryty a projevují se pouze zvýšenou spotřebou energie. Pokud by jednotka nebyla častěji kontrolována, a nebo nějakým způsobem monitorována, mohla by s touto závadou pracovat bez povšimnutí i několik let [8]. Takovýto provoz je velice neefektivní a přispívá k poměrně vysokému podílu HVAC jednotek na celkovém množství spotřebované energie.

Příklady typických závad HVAC jednotek[1, 6, 8]:

Zaseknutá klapka Při provozu se může časem stát, že se klapka vlivem rzi, nějaké nečistoty nebo vlivem normálním opotřebením zasekne. Tento druh poruchy je typický pro korozivní prostředí například v pobřežní oblasti. Většina HVAC jednotek není dostatečně vybavena senzory na to, aby mohla chybu detekovat.

Zanesení filtru Vlivem prachu a jiných nečistot může dojít k zanesení filtru v jednotce. Kromě špatné průchodnosti vzduchu filtrem hrozí také množení různých mikroorganismů, zvláště při silném zanesení nebo vlhnutí filtru.

Nedoléhání klapek Tato situace nastává, když se klapky nedokáží dostat do svých krajních poloh. Tento problém je významný zejména při využívání by-passu, který vede kolem rekuperátoru. Pokud by v režimu 100% využívání rekuperátoru zůstala klapka byt jen trochu nedovřená, kvůli tlakovému profilu rekuperátoru by jej velké množství vzduchu touto netěsností obcházelo.

Offset a drift senzorů Senzory často nebývají pravidelně kontrolovány a kalibrovány, a proto je možné u nich narazit na offset nebo drift. Tyto závady představují problém zejména při řízení jednotek. Na drift jsou pak zvláště náchylné senzory měřící relativní vlhkost.

Ohřev a chlazení současně Může nastat situace, kdy jednotka bude mít spuštěný ohřev i chlazení současně, například při špatné funkci směšovacího ventilu. Takovýto stav vede k vysoké spotřebě energie, ale pro uživatele nacházejícího se uvnitř klimatizované budovy, nemusí být vůbec zaznamatelný.

Výše zmiňované, ale i jiné závady, typické pro HVAC systémy, vedou k otázce, zda by nebylo možné podobným problémům předcházet. Častější a důkladnější kontroly mohou být ale vzhledem k velkému množství HVAC jednotek značně finančně náročné. Jako lepší řešení se zde jeví nasazení FDD metod, které dokáží včas podobné problémy odhalit. Nevýhodou těchto metod je, že potřebují velké množství dat a tedy i velké množství senzorů [9]. Vzhledem k tomu, že ani

moderní jednotky nejsou dostatečně vybaveny senzory, nabízí se zde řešení v podobě využití virtuálních senzorů.

Právě za tímto účelem vznikl projekt experimentální HVAC jednotky. Hlavní funkcí této unikátní jednotky je sběr velkého množství dat, která mohou být dále zpracovávána. Navíc je možné na experimentální jednotce simulovat velké množství závad, které jsou pro HVAC jednotky typické. Na základě naměřených dat pak bude možné vyvíjet FDD metody, které by dokázaly podobné závady odhalit a přispět tak k efektivnějšímu a ekonomičtějším provozu jednotek. Kromě testování a vývoje FDD metod je možné využít velké množství naměřených dat k sestavení matematických modelů. Tyto modely mohou být použity k návrhu virtuálních senzorů, které by nahradily chybějící senzory v HVAC jednotkách.

Projekt vzniká ve spolupráci dvou fakult na ČVUT. Stavební fakulta poskytla samotnou experimentální jednotku, ke které byl z elektrotechnické fakulty dodán systém pro sběr dat. Elektrotechnická fakulta má v plánu sestavit na základě dat, poskytnutých jednotkou, matematický model a na něm testovat možnosti využití virtuálních senzorů.

1.2. Fault Detection and Diagnostics - FDD metody

FDD je oblast zabývající se automatizací procesů pro odhalování chyb na fyzických systémech a určování jejich příčin. Zatímco v jiných oblastech, jako je například letecký a automobilový průmysl, jsou tyto metody už po delší dobu zavedeny, aplikace v oblasti HVAC jednotek je stále ještě v rané fázi vývoje.

Hlavní funkcí FDD systémů je včasné odhalení poruch a na základě diagnostiky těchto poruch je dále rozhodnuto o příslušných akcích. Při detekování nějaké závady bývá vyhodnocena její závažnost a podle toho se rozhoduje, zda má být provoz zastaven, případně jestli je možné chybu tolerovat nebo jen korigovat regulační soustavou [2, 4, 5].

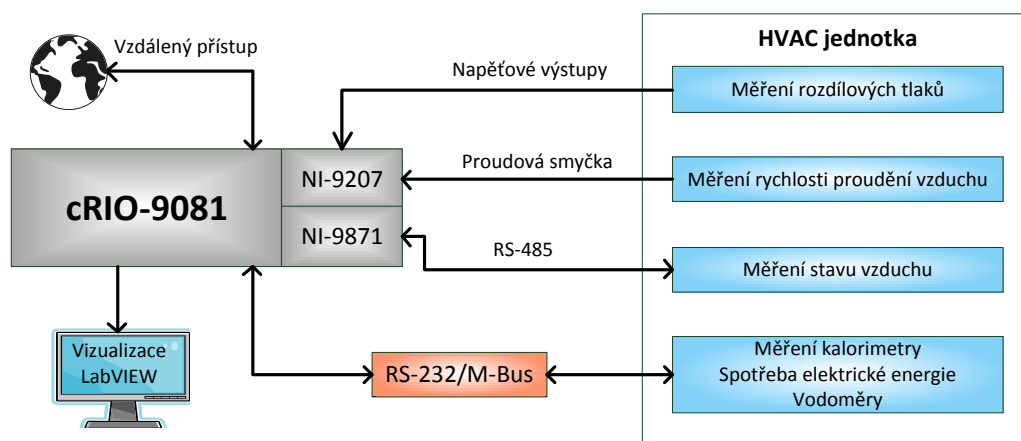
1.3. Virtuální senzory

Problém při použití FDD metod nastává ve chvíli, kdy v systému není dostatečné množství senzorů. Jeden z možných způsobů, jak nahradit v systému chybějící senzory je použít virtuální senzory. Virtuální senzory odhadují předpokládanou hodnotu dané veličiny na základě matematického modelu systému, který využívá data získaná z jiných dostupných snímačů. Tento přístup se používá zejména v situacích, kdy není možné danou veličinu měřit nebo kdy by osazení potřebnými senzory bylo ekonomicky nevhodné [11].

POPIS SYSTÉMU

2.1. Blokové schéma systému

Diagnostický systém experimentální HVAC jednotky znázorňuje blokové schéma na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1.: Blokové schéma systému

Základní blok zde tvoří jednotka pro sběr dat, Compact RIO-9081 (cRIO), se zásuvnými moduly NI-9207 a NI-9871. Jednotka je zodpovědná za sběr, zpracování a ukládání dat, naměřených na experimentální HVAC jednotce, a jejich následnou vizualizaci a zpřístupnění uložených dat přes internet.

Modul NI-9207 umožňuje měřit napětí na senzorech s napěťovými výstupy a proud procházející senzory, které používají na výstupu proudovou smyčku. Napěťových výstupů využívá všech

6 senzorů pro měření rozdílových tlaků, které jsou umístěny přímo na jednotce. Pro měření rychlosti proudění vzduchu se používají anemometry s výstupem do proudové smyčky. V systému se nachází celkem 4 a jsou na HVAC jednotce umístěny na přívodech a odvodech vzduchu.

Modul NI-9871 slouží ke komunikaci po sériové lince RS-485. Přes sériovou linku jsou připojeny senzory měřící stav vzduchu. Senzory měří teplotu vzduchu, relativní vlhkost a z naměřených hodnot se pak při zpracování dopočítávají další užitečné veličiny. Přímo na HVAC jednotce a na přívodech a odvodech vzduchu je umístěno celkem 10 senzorů a jeden senzor se nachází v testovací místnosti, ke které je jednotka připojena.

Ostatní senzory, využívající sběrnici M-Bus, jsou připojeny přes převodník RS-232/M-Bus k sériovému portu, umístěnému přímo na jednotce cRIO. Jedná se o senzory měřící energii, spotřebovanou při topení nebo chlazení HVAC jednotky, senzory pro měření spotřeby elektrické energie a vodoměr, měřící spotřebu vody ve zvlhčovači.

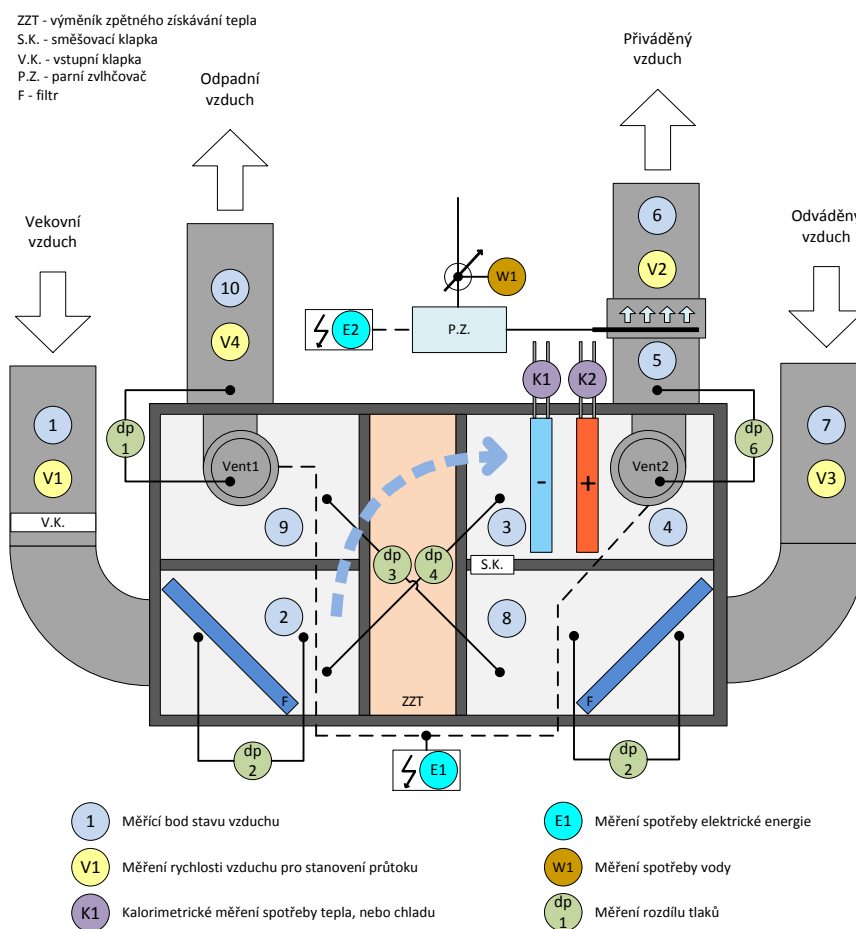
2.2. Klimatizační jednotka

V experimentálním systému je použita HVAC jednotka vyrobená firmou Atrea. Jedná se o univerzální kompaktní větrací jednotku s rekuperací tepla, která byla vyrobena na zakázku a typově se podobá jednotkám řady DUPLEX-S. Jednotku tvoří skříň z lakovaného plechu, uvnitř které se nachází dva nezávisle poháněné radiální ventilátory s pružně uloženými motory, vysoce účinný protiproudý rekuperační výměník tepla s velkou teplosměnnou plochou, výsuvné filtry přiváděného i odváděného vzduchu a odvodňovací vany. Jednotka je navíc vybavena interní cirkulační a by-passovou klapkou se servopohonem, ohřívačem, chladičem a jednotku je řízena přidaným regulačním systémem[1].

Schéma jednotky včetně všech přidaných senzorů je na obrázku 2.2. Venkovní vzduch je k jednotce přiváděn potrubím přes vstupní klapku do první komory. V této komoře se nachází filtr, který slouží k zachytávání prachových částic a drobných nečistot. Vzduch pak dále postupuje přes rekuperátor (výměník zpětného získání tepla), kde je predehříván teplem, získaným z odváděného vzduchu. V případě potřeby může být vzduch procházející přes rekuperátor odkloněn pomocí by-passu (ve schématu vyznačen modrou přerušovanou šipkou). Rekuperátor bývá odpojován ve chvíli, kdy kvůli nepříznivým podmínkám vedoucím ke vzniku námrazy, hrozí poškození rekuperátoru. Za rekuperátorem se nachází komora, ve které je umístěn výstup ze směšovací klapky, ohřívač a chladič. Směšovací klapka je ovládána současně s vstupní klapkou a společně jsou využívány k nastavení požadovaného procentuálního poměru cirkulace vzduchu. Ohřátý, případně ochlazený vzduch je vyfukován ventilátorem do potrubí, kde prochází výstupem z parního zvlhčovače. Odtud vzduch proudí dále do testovací komory.

Z testovací komory se vzduch vrací do jednotky přes filtr ke směšovací klapce. V závislosti na požadovaném poměru cirkulace je, buď vrácen zpět do jednotky odkud putuje do testovací komory, nebo je přes rekuperátor vyfukován ven.

Regulační systém využívá k řízení jednotky několik od výrobce zabudovaných senzorů. Jedná se o dva senzory rozdílového tlaku a čtyři senzory teploty (originální zabudované senzory nejsou vyznačeny na obrázku 2.2). Senzory rozdílového tlaku jsou umístěny na filtru na přívodu vzduchu z venčí a na filtru na přívodu vzduchu z místnosti. Senzory teploty se nachází v přívodu vzduchu z venčí, před ohřívačem a chladičem, před přívodním ventilátorem (Vent 2) a před odpadním ventilátorem (Vent 1). Natáčení klapek je řízeno pouze časem, po který je servomotor připojen k napájení. Chybí zde tedy zpětná vazba, podle které by regulátor věděl, zda se klapky opravdu natáčejí.



Obrázek 2.2.: Schéma experimentální HVAC jednotky včetně senzorů

2.3. Jednotka pro sběr dat

Sběr dat z jednotlivých senzorů obstarává platforma Compact RIO-9081 od firmy National Instruments. Jednotka je zodpovědná kromě samotného sběru dat i za jejich následné zpracování, zobrazení do grafů, vizualizaci a ukládání na disk. K uloženým datům je vytvořen vzdálený přístup přes internet.

2.3.1. Platforma NI CompactRIO-9081

CompactRIO je konfigurovatelný systém učený pro sběr dat a řízení. K systému je možné připojit různé I/O moduly, se kterými komunikuje vestavěný řadič pomocí programovatelného hradlového pole (FPGA, Field Programmable Gate Array). Díky využití FPGA dokáže systém pracovat velice rychle a proto je vhodný i pro Real-Timeové aplikace. Samotná platforma je programovatelná programem LabVIEW, také od National Instruments, rozšířeným o FPGA modul.

CompactRIO se vyrábí ve dvou verzích. První verze je Real-Time CompactRIO a je programována z externího počítače ke kterému je připojena ethernetovým kabelem. Jedná se o vestavěný systém, který obsahuje dokovací konektory pro připojení I/O modulů a konektory pro komunikaci s počítačem, přes který je programována. Tato verze je jednodušší, bývá obvykle menší, co se počtu dokovacích konektorů pro I/O moduly týče, a je levnější. Druhá verze, která byla použita v tomto projektu, je Windows CompactRIO. Je to verze se zabudovaným plnohodnotným počítačem, na kterém běží speciálně optimalizovaný operační systém Embedded Windows 7. Přímo na tomto zabudovaném počítači může být nainstalován program LabVIEW a různé další potřebné programy. Počítačová část platformy obsahuje klasické vstupy a výstupy jako jsou USB porty, sériová linka a VGA výstup na monitor. Navíc může být tato platforma přepnuta do režimu, kdy je počítač odpojen a platforma se chová jako Real-Time CompactRIO.

Aby bylo možné využít FPGA, přes které jsou připojeny I/O moduly, musí být FPGA nejprve naprogramováno. Toho je možné dosáhnout třemi různými způsoby. První možnost je nainstalovat kompilační software přímo s programem LabVIEW. Druhá možnost je založit si server, na kterém poběží kompilační software a posílat na něj data, která mají být zkompilována. Server pak vrátí výsledná data, která slouží pro nastavení FPGA. Poslední možností je využít kompilačního cloudu přímo od National Instruments. Princip je podobný předchozímu způsobu s tím rozdílem, že se o výpočet se starají výkonné servery National Instruments. Tato možnost je výhodnější u větších projektů, kde se dá předpokládat, že bude nutné často kompilovat náročnější aplikace a také bude potřeba kompilovat více aplikací najednou. Servery National Instruments bývají různě vytížené a proto při kompilaci jednoduchých aplikací bývá doba kompilace značně proměnlivá. V našem projektu se doba kompilace pomocí cloudu pohybovala mezi 10 až 30 minutami.

Platforma NI CompactRIO-9081 má následující parametry:

Počítačová část

- Procesor 1.06 GHz dual-core Intel Celeron
- 16 GB úložného prostoru
- 2 GB DDR3 800 MHz RAM
- MXI-Express, 4x Hi-Speed USB , 2x Gigabit Ethernet, RS-232, RS-485/422, VGA Video konektor

Modulová část

- 8 dokovacích slotů pro připojení I/O modulů
- Spartan-6 LX75 FPGA

Napájení a pracovní podmínky

- Vstupní napětí - DC 9 - 30 V
- Maximální příkon 75 W
- Rozsah provozních teplot 0 - 55 °C

2.3.2. Přídavné I/O moduly

Pro sběr a zpracování dat z jednotlivých senzorů byly vybrány 2 základní I/O moduly. Jedná se o modul NI 9207, pro měření analogových veličin a NI 9871, pro komunikaci po sběrnici RS-485. V současné době projekt stále běží a počítá se s jeho postupným rozšiřováním. O to by se měl postarat další zakoupený modul pro měření napěťových výstupů, NI 9205, který se časem připojí k systému. Jednotlivé moduly jsou na obrázku 2.3.

NI 9207

NI 9207 je modul pro měření napětí a proudu. Obsahuje 16 kanálů, kde 8 je pro měření napěťových výstupů a 8 pro měření s proudovou smyčkou. Na výstupu modulu se nachází 37mi pinový konektor, který má 16 ± pinů pro napěťový výstup, 4 COM piny, 8 pinů pro měření proudu a 9 pinů Vsup, které jsou všechny propojeny. Při měření s proudovou smyčkou je nutné na jeden Vsup pin přivést napájecí napětí a z ostatních Vsup pinů napájet všechny měřené smyčky. Pro snazší připojení přívodních kabelů k modulu je možné zakoupit svorkovnici, která se připojí přímo na 37mi pinový konektor.



Obrázek 2.3.: Moduly (zleva NI 9207, NI 9871, NI 9205)

Maximální rychlost vzorkování je 500 vzorků za sekundu pro všechny kanály, z čehož vyplývá, že maximální rychlost vzorkování pro jeden kanál je okolo 30 vzorků za sekundu. Parametry modulu jsou následující:

- 8 proudových vstupů (± 21.5 mA) a 8 napěťových vstupů (± 10 V)
- 500 S/s (vysokorychlostní mód vzorkování)
- Externí napájení pro V_{sup} - max 30 V/2 A
- Rozsah provozních teplot -40 až 70 °C

NI 9871

NI 9178 je modul, který obsahuje 4 nezávislé sériové porty RS-485 (RS-422). Komunikace může být jak v polo-duplexním režimu po dvou vodičích, tak i v plně-duplexním režimu po čtyřech vodičích. K jednotlivým sběrnicím se připojuje desetivodičový kabel s konektorem RJ45. Modul vyžaduje pro napájení sběrnic externí stejnosměrný zdroj, s napětím 8 až 28 V. Parametry modulu jsou následující:

- 4 RS-485/RS-422
- Maximální přenosová rychlost 3,684 Mbaud
- Nastavení přenosu - Datové bity 5, 6, 7, 8; Stop bity: 1, 1.5, 2; Řízení toku: XON/OFF, RTS/CTS, žádné
- Rozsah provozních teplot -40 až 70 °C

NI 9205

NI 9205 je modul pro měření napětí. Obsahuje 32 kanálů, kde je možné měřit buď 32 napětí, pokud mají všechny společný zemní potenciál (Referenced Single-Ended), nebo 16 nezávislých napětí (Differential Measurements). Každý kanál má programovatelné měřicí rozsahy, na kterých se měří s 16-bitovým rozlišením. Maximální vzorkovací rychlost je 250kS/s na všechny kanály dohromady. Modul je navíc vybaven přepěťovou ochranou na ± 30 V. Výstup modulu má 2 provedení. Buď 36ti pinovou svorkovnicí přímo na modulu nebo 37mi pinový konektor. Parametry modulu jsou následující:

- 32 vstupů se společným zemním potenciálem nebo 16 diferenčních vstupů
- 16-bitové rozlišení, 250 kS/s
- Programovatelné rozsahy: ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V, a ± 10 V
- Přepěťová ochrana ± 30 V
- Rozsah provozních teplot -40 až 70 °C

2.3.3. Komunikace se senzory

V závislosti na použitých modulech je možné připojit k platformě cRIO-9081 různé typy senzorů. V tomto projektu jsou senzory připojeny čtyřmi odlišnými způsoby. Bylo využito sběrnice RS-485, měření napěťového výstupu, proudové smyčky a sběrnice M-Bus.

RS-485

Sběrnice RS-485 je sériová linka, určená pro komunikaci v průmyslových aplikacích. Sběrnice je podobná sériové lince RS-232, využívá však v polo-duplexním režimu pouze 2 vodiče a má jiné napěťové úrovně. Na sběrnici je možné připojit až 32 zařízení. Délka sběrnice by neměla překročit 1200 m a měla by být zakončena terminátorem (rezistorem) o hodnotě 120Ω .

Přes sběrnici RS-485 jsou v projektu připojeny všechny senzory určené pro měření stavu vzduchu. Všem sensorům musely být nejprve nastaveny unikátní adresy a byly přepnuty do módu POLL. V tomto módu každý ze sensorů poslouchá a čeká na dotaz, který bude adresován právě jemu. Po obdržení dotazu odešle zpět data o stavu vzduchu pouze sensor, který byl adresován, zatímco ostatní mlčí.

Pro komunikaci po sběrnici RS-485 byl použitý zásuvný modul NI 9871. Přenos dat a jednotlivé senzory jsou nastaveny podle následujících parametrů:

- Datová rychlost - 19200
- Parita - žádná

- Šířka rámce - 8 bitů
- Počet stop bitů - 1
- Řízení toku - žádné

Napěťový výstup

U senzorů s napěťovým výstupem se měří na výstupu napětí, které odpovídá měřené veličině. Takovýto výstup bývá standardně lineární a proto je snadné vypočítat výslednou hodnotu měřené veličiny pouhým přenásobením konstantou.

Napěťové výstupy ze senzorů jsou měřeny modulem NI 9207. Tohoto principu je využito u všech senzorů měřících rozdíl tlaku. Všechny zvolené senzory mají lineární výstup 0 až 10 V.

Proudová smyčka

Proudová smyčka 4 až 20 mA je standard hojně využíván v průmyslových aplikacích. Je to jeden z nejpoužívanějších způsobů přenosu informace v oblasti průmyslové automatizace. Proudová smyčka umožňuje přenos informace na velké vzdálenosti a navíc je velmi odolná proti rušení. Díky minimální hodnotě protékajícího proudu (4 mA) je snadné odhalit případné problémy na proudové smyčce, jako je například přerušování vedení či poškození senzoru. Výhodou proudové smyčky je, že z ní může být senzor přímo napájen a není tedy nutné přivádět další vodiče.

V projektu jsou senzory s proudovou smyčkou připojeny k modulu NI 9207. Jedná se o anemometry měřící rychlost proudění vzduchu.

M-Bus

M-Bus je komunikační standard sloužící ke sběru dat z nejrůznějších měřičů spotřeb energií. Je to dvou vodičová sběrnice s poloduplexním přenosem informace typu master/slave, kde master řídí komunikaci a může k ní být připojeno až 250 zařízení. Výhodou sběrnice je velká odolnost proti rušení, zabezpečení proti chybám a možnost připojení zařízení na velkou vzdálenost. Nevýhodou je ovšem pomalá rychlost přenosu dat, která je v rozmezí 300 až 9600 Bd.

Fyzická vrstva je atypická a liší se od ostatních sběrnic v jednotlivých úrovních a ve způsobu komunikace. Zařízení typu master komunikuje s účastnickými stanicemi logickými úrovněmi 36 V pro log. 0 a 24 V pro log. 1. Zařízení typu slave odpovídá změnami proudu, kdy log. 1 odpovídá proudu 1,5 mA a log. 0 proudu 11 až 20 mA. Díky klidovému proudu v log. 1 je možné účastnické stanice napájet přímo po sběrnici.

V projektu je sběrnice M-Bus využita pro komunikaci se senzory měřícími spotřebu energií a vody. Sběrnice je připojena k sériovému portu, který se nachází v počítačové části platformy cRIO. Jako převaděč úrovní mezi sériovou linkou a sběrnici M-Bus je využit konvertor od firmy Domat. Sériová linka je nastavena podle následujících parametrů:

- Datová rychlost - 2400
- Parita - sudá
- Šířka rámce - 8 bitů
- Počet stop bitů - 1
- Řízení toku - žádné

2.4. Program

Pro sběr a zpracování dat ze všech senzorů připojených k systému byl v grafickém programovacím jazyce LabVIEW od National Instruments vytvořen program. Tento program má za úkol komunikovat se všemi senzory připojenými přes různá rozhraní a získat z nich data. Tato data následně zpracovat, vizualizovat a uložit na disk, kde je k nim pak vytvořen vzdálený přístup přes internet. Program je rozdělen do dvou hlavních částí, které spolu navzájem komunikují.

2.4.1. FPGA Target

FPGA Target představuje jednotku, ve které se nastavují jednotlivé moduly, a také se zde nachází základní blok programu, který definuje komunikaci s moduly. Takovýto blok programu se v LabVIEW označuje jako Virtual Instrument (VI). Ve VI umístěném přímo v FPGA Targetu je definováno, se kterými moduly se bude pracovat a jsou zde vyvedeny vstupy a výstupy z jednotlivých modulů. Oproti klasickým VI má VI umístěné v FPGA Targetu omezený výběr bloků, které je možné využívat. To je způsobeno tím, že tato část programu slouží pro nastavení FPGA a mohou zde být použity jen bloky, se kterými FPGA umí pracovat. Při jakékoliv modifikaci VI, umístěného v FPGA Targetu, musí tato část programu vždy projít kompilací, kde je vytvořen binární soubor, kterým se pak FPGA nastavuje.

Ve VI uvnitř FPGA Targetu se nachází dvě hlavní while smyčky, které jsou nezávislé a běží paralelně. První z nich obsahuje bloky potřebné ke komunikaci přes sériovou linku (modul NI 9871) a v druhé se nachází vstupy modulu měřícího proud a napětí (moduly NI 9207). Hodnoty měřené modulem NI 9207 jsou navíc průměrovány.

2.4.2. Vlastní Virtual Instrument

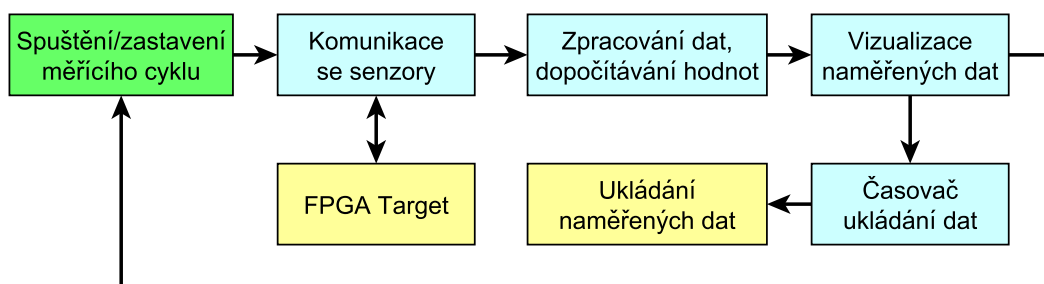
Druhá část programu slouží k samotnému zpracování, vizualizaci a ukládání dat. Jedná se již o klasické VI, které na rozdíl od VI v FPGA Targetu, nemusí procházet zdlouhavou kompilací, protože neslouží k nastavení FPGA, ale běží přímo v počítači. Takovéto VI obsahuje grafické prvky, jako jsou tlačítka, grafy, slidebary a ostatní ovládací prvky běžné v prostředí Windows.

VI, použité v tomto projektu, funguje tak, že po spuštění měření projde program jeden senzor po druhém, přes všechny dostupné periferie a získá z nich potřebná data. Data převede do vhodného formátu a z naměřených hodnot dopočítá další užitečné údaje. K měřeným datům přistupuje pomocí FPGA Targetu, který běží samostatně na FPGA a zajišťuje komunikaci s připojenými moduly.

K datům ze senzorů připojených přes sběrnici RS-485 přistupuje tak, že nejprve pošle příkaz, který obsahuje adresu senzoru a pokyn k odeslání naměřených dat. Program pak počká 330 ms a vyčte ze zásobníku v FPGA Targetu odpověď, kterou senzor odeslal. Dotaz i odpověď chodí jako řetězec typu string a proto je nutné, po přijetí dat, je rozložit na jednotlivé hodnoty a převést na datový typ double, se kterým se pak dále lépe pracuje. Změřené a zpracované data jsou pak ukládána do pole. Po přečtení všech dat ze senzorů připojených přes sběrnici RS-485, vyčte program z FPGA Targetu naměřené hodnoty u senzorů s napěťovými výstupy a proudovou smyčkou. FPGA Target tyto hodnoty neustále měří a aktualizuje na pozadí. Poslední data jsou získána z OPC¹ serveru a jsou to data ze senzorů na sběrnici M-Bus.

Z naměřených hodnot jsou dopočítávány další užitečné veličiny. Sensory měřící stavu vzduchu, vrací teplotu, relativní vlhkost vzduchu a rosný bod. Z těchto veličin se pak ještě dopočítává měrná vlhkost vzduchu [g/kg s.v.]², měrná entalpie [kJ/kg s.v.] a měrná hmotnost [kg/m^3 s.v.]. Z rychlosti proudění se dopočítává ze znalosti průměru a tvaru potrubí průtok vzduchu [m^3/h]. Na základě těchto veličin je dopočítána ještě aktuální účinnost zpětného získávání tepla [%], výkon ohřívače/chladiče [W], zvlhčovací výkon [kg/s] a ohřev vzduchu na ventilátoru [K, W].

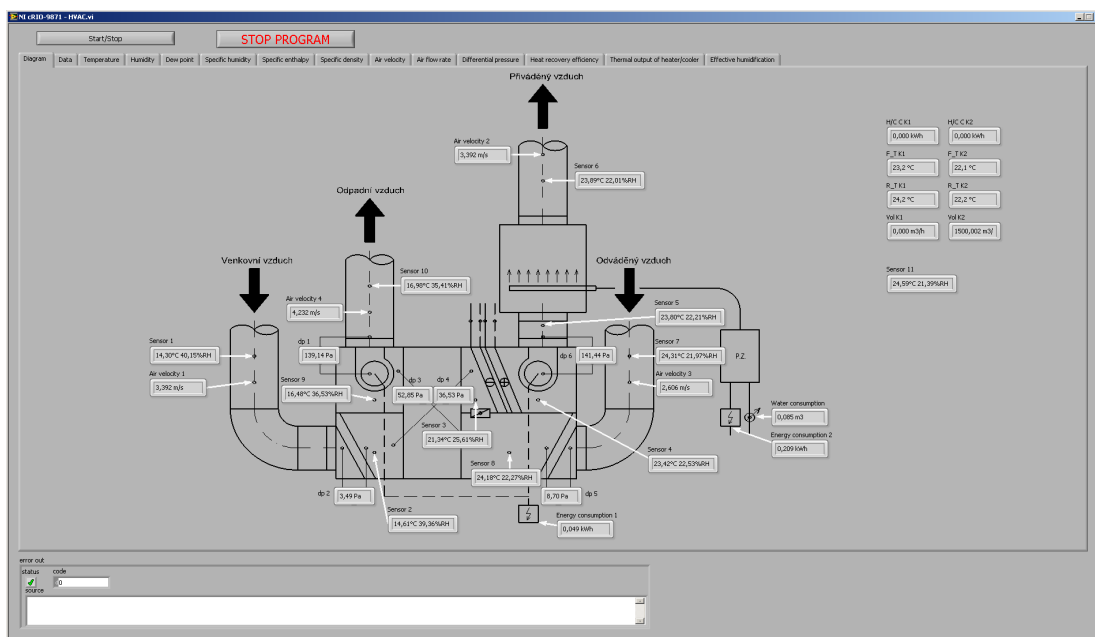
Po skončení odměru jedné sady dat jsou v programu všechna data v různých formách vizualizována. První formou je schéma HVAC jednotky, kde jsou veličiny zobrazeny na místech, kde byly naměřeny. Další formou vizualizace je výpis všech naměřených dat do tabulek. Nakonec jsou důležité veličiny vykresleny do grafů. Diagram popisující funkci programu je na obrázku 2.4. Náhled na vizualizaci naměřených hodnot v programu je na obrázku 2.5.



Obrázek 2.4.: Diagram popisující funkci programu

¹OPC - Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control, je standard navržený pro propojení softwarových aplikací s hardwarem

²s.v. - zkratka pro suchý vzduch



Obrázek 2.5.: Ukázka programu - schéma jednotky s naměřenými hodnotami

Odměr jedné sady dat trvá zhruba 3,5 vteřiny a je to způsobeno zejména čekáním na odpověď senzorů na sběrnici RS-485. Odměr dat z napěťových výstupů a proudové smyčky trvá jen 0,5 vteřiny a proto je v FPGA Targetu nastaveno průměrování ze šesti posledních vzorků tak, aby to pokrylo čas strávený čekáním na dokončení komunikace po sběrnici RS-485. Po uplynutí určitého času, který je možné nastavit, je poslední celá poslední sada dat uložena do textového souboru, který má jméno shodné se dnem, kdy byla data naměřena. Vzhledem k tomu, že se u jednotky nepředpokládají rychlé změny, není nutné ukládat každou změřenou sadu dat.

2.4.3. Komunikace po sběrnici M-Bus

Testovací systém využívá některé senzory, které komunikují přes sběrnici M-Bus. Samotné LabVIEW nemá potřebné knihovny, přes které by bylo možné komunikovat po sběrnici M-Bus přímo a proto musel být zvolen jiný přístup. Bylo vybráno řešení, které nabízí firma Domat.

Sběrnice M-Bus je připojena přes převodník úrovní Domat M095 k sériovému portu RS-232, který se nachází na počítačové části platformy cRIO a je přístupný přímo z operačního systému. K tomuto převodníku úrovní je možné připojit až 26 přístrojů.

Kvůli specifické linkové vrstvě, kterou využívá sběrnice M-Bus, musel být v počítači nainstalován software zajišťující komunikaci po sběrnici. Na pozadí operačního systému běží služba, která spouští předem nadefinovaný projekt. Projekt obsahuje runtime pro komunikaci po sběrnici M-Bus a OPC server pro sdílení naměřených dat. V runtime je definováno, jaké senzory se

na sběrnici nachází a jaká data z nich mají být vyčítána. Tato data jsou po vyčtení předána OPC serveru, který je pak zpřístupní dalším programům.

Aby bylo možné získat data z OPC serveru, musel být do LabVIEW doinstalován DSC³ modul. Tento modul obsahuje Shared Variable Engine, který dokáže získat data z OPC serveru a zpřístupnit je v programu jako proměnné typu bound variable.

Odměr dat sice probíhá kontinuálně, ale změna některé veličiny měřené přístroji na sběrnici M-Bus se v programu aktualizuje až po půl minutě. To je způsobeno jednak rychlostí sběrnice M-Bus a také poměrně složitou cestou, kterou se data do programu dostávají. Samotné přístroje na sběrnici jsou taky poměrně pomalé a aktualizují měřené údaje jen jednou za minutu. Stejně tak, jako u jiných veličin, se ani zde nepředpokládají rychlé změny a proto i takovéto zpoždění nemá ve výsledku žádný význam.

2.4.4. Indexování hodnot

Měřená data jsou po určité době ukládána do textového souboru. Jedna uložená sada dat představuje jeden řádek v souboru a začátek každého řádku je ještě doplněn o aktuální datum a čas. Soubor s příponou txt má vždy jméno podle aktuálního data. Všechna data z jednoho dne se ukládají do stejného souboru a každý nový den je založen jeden nový soubor. Pro zjednodušení načítání dat pro pozdější zpracování soubor neobsahuje žádnou legendu, která by vysvětlovala co, který údaj znamená. Proto je nutné mít při zpracování dat k dispozici tabulku popisující jednotlivé údaje. Tabulka A.1 s čísly údajů udávajících pozici záznamu v textovém souboru se nachází v příloze.

2.4.5. Vzdálený přístup

K uloženým dům byl vytvořen vzdálený přístup přes internet. Data jsou sdílena přes program Google Drive, který zajišťuje přístup k naměřeným datům i ve chvíli, kdy je testovací systém vypnut. Na disku je umístěna sdílená složka pro ukládání naměřených dat a program Google Drive obsah této složky duplikuje na server, kam je vybraným uživatelům umožněn přístup. Pro všechny uživatele, kterým jsou data sdílena, jsou přiřazeny práva pouze pro čtení. Jediný kdo má právo upravovat obsah složky je uživatel přihlášený pod účtem spravující tuto složku, případně pak uživatel který by měnil obsah složky přímo na disku, na který jsou data ukládána.

³DSC - Datalogging and Supervisory Control, je modul rozšiřující LabVIEW o další funkce

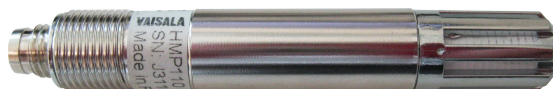
2.5. Použité senzory

2.5.1. Měření stavu vzduchu

Pro měření stavu vzduchu byl vybrán senzor Vaisala HMP110. Senzor měří teplotu v rozsahu -40 až 80°C a relativní vlhkost v rozsahu 0 až 100%. Senzor měří teplotu s přesností $\pm 0,2$ °C v rozsahu 0-40°C a $\pm 0,4$ °C ve zbytku rozsahu. Relativní vlhkost je měřena s přesností $\pm 1,5$ % RH na rozsahu 0-90 % RH a s přesností $\pm 2,5$ % RH na zbytku rozsahu. Teplota je měřena termistorem Pt1000. Relativní vlhkost vzduchu měří čidlo, které vyrábí přímo Vaisala a je označováno jako HUMICAP® 180R. Senzor je vyráběn jako kovová sonda, kde jsou čidla uložena za membránovým filtrem. Provedení senzoru je patrné z obrázku 2.6. K senzoru je dodávána plastová trubička, do které je možné senzor našroubovat a následně instalovat do systému. Výstup tvoří čtyř-vodičový konektor, ke kterému je dodáván příslušný kabel. Senzor může být nastaven pro komunikaci buď v analogovém, nebo v digitálním módu. Pro digitální komunikaci se používá sběrnice RS-485. Naměřené hodnoty, vrácené senzorem v tomto módu, mají následující podobu:

$$T= 24.73 \text{ 'C} \quad RH= 37.81 \text{ \%RH} \quad Td= 9.39 \text{ 'C}$$

V analogovém módu má senzor dvoukanálový napěťový výstup, kde každý z kanálů odpovídá jedné měřené veličině, případně může být připojen přes konvertor na proudovou smyčku. Při komunikaci pomocí RS-485 vrací senzor buď automaticky, nebo na dotaz naměřené hodnoty jako řetězec znaků. Standardně vrací celkem tři údaje a to teplotu, relativní vlhkost a z naměřených hodnot dopočítá ještě rosný bod. Senzor nabízí spoustu nastavení, která definují, jak a jakým způsobem bude data předávat.



Obrázek 2.6.: Senzor Vaisala HMP110

2.5.2. Měření rychlosti průtoku vzduchu

Rychlost proudění vzduchu je měřena turbínkovými anemometry vyráběné firmou Höntzsch. Měřicí rozsah anemometrů je 0 až 20 m/s. Senzory měří s nejistotou 1,5 % z měřené hodnoty + 0,5 % z měřicího rozsahu. K senzoru je od výrobce dodáván dvou vodičový kabel. Výstup senzoru je řešen jako lineární proudová smyčka 4 až 20 mA, kde 4 mA odpovídají nulové rychlosti proudění vzduchu a 20 mA odpovídá 20 m/s. Pro výpočet měřené hodnoty je pak použit vzorec $v = [(i \cdot 1000) - 4] \cdot (20/16)$, kde i je měřený proud v mA a v je výsledná rychlost proudění vzduchu v m/s.

Senzor je uložen v kovovém pouzdře, ve tvaru válce, kde na jednom konci je turbínka a na druhém konektor pro kabel. Konstrukce je patrná z obrázku 2.7. Otáčení turbínky je detekováno indukčním snímačem. Anemometry použité v projektu nedokáží rozeznat směr otáčení turbínky a tím pádem ani směr proudění vzduchu. Veškerá elektronika, která převádí impulsy z indukčního snímače na lineární proudový výstup je ukryta uvnitř senzoru. Senzor je z proudové smyčky přímo napájen.



Obrázek 2.7.: Turbínkový anemometr značky Höntzsch

2.5.3. Měření rozdílových tlaků

Jako čidla tlakové diference jsou použity senzory značky Siemens. V závislosti na očekávaném tlaku v různých částech systému byly vybrány 3 modely. Model QBM2030-5 má 3 měřicí rozsahy, 0-200 Pa, 0-250 Pa a 0-500 Pa a měří s přesností $\pm 3 \%$ v celém rozsahu. Druhý model QBM2030-30 má stejné parametry jako předchozí, akorát má jiné rozsahy a to 0-1000 Pa, 0-1500 Pa a 3000 Pa. Poslední model QBM3020-3 měří s přesností $\pm 0,7 \%$ a měřicí rozsah se dá nastavit potenciometrem na finální hodnotu v rozmezí 100-300 Pa. Všechny senzory mají lineární výstup 0 až 10 V a musí být napájeny externím zdrojem napětí 13,5-33 V. Pro kalibraci senzorů je nutné oba vstupy mít na stejném tlakovém potenciálu a stisknout tlačítko pro vynulování výstupu.

Při instalaci senzorů musela být dodržena určitá pravidla. Senzory se musí nacházet výše, než jsou místa odběru tlaků a taky musí být ve svislé poloze. Při nedodržení těchto podmínek by mohla v přívodních trubicích zkondenzovat voda a natéct do senzoru. Navíc musí být přívodní trubice stejně dlouhé a neměly by být nějak výrazně zkroucené. Při instalaci muselo být odhadnuto, ve které z trubic se bude při provozu nacházet větší tlak, protože senzory nesnesou příliš velké záporné přetížení. Podle očekávaných tlaků byly senzorům přiřazeny rozsahy 0-1000 Pa na ventilátorech, 0-300 Pa na filtrech a 0-200 Pa na rekuperátoru. Provedení senzoru je patrné z obrázku 2.8. QBM2030-5



Obrázek 2.8.: Senzor rozdílového tlaku Siemens QBM2030-5

2.5.4. Měření spotřeby vody

Pro měření spotřeby vody zvlhčovače byl vybrán vodoměr Siemens WFC21.E130. Senzor měří s metrologickou třídou přesností B, tedy měření spotřeby kapaliny od min. průtoku 30l/h s přesností měření $\pm 5\%$ (max. teplota vody 30 °C a nominální průtok 1,5 m³/h). Přístroj zobrazuje celkový údaj o spotřebě na LCD displeji a komunikuje prostřednictvím sběrnice M-Bus. Přístroj je zobrazen na obrázku 2.9.

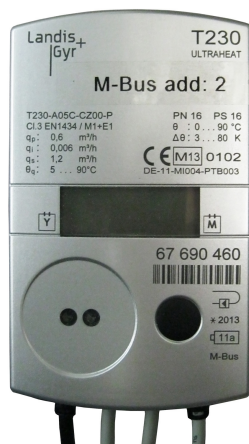


Obrázek 2.9.: Vodoměr Siemens WFC21.E130

2.5.5. Měření spotřeb energií

Pro měření spotřeby energie byl zvolen ultrazvukový měřič tepla a chladu, Landis+Gyr ULTRA-HEAT/ULTRACOLD T230. Přístroj měří ultrazvukově průtok kapaliny, její teplotu na vstupu a na výstupu ze systému. Z naměřených hodnot pak vypočítá spotřebu energie, kterou zobrazuje na displeji [kWh]. Spotřeba energie je měřena s maximální chybou 2 %. Přístroj umožňuje dále zobrazit i další naměřené a vypočítané hodnoty, jako jsou kumulovaný objem [m³], aktuální průtok [m³/h], aktuální tepelný výkon [kW], teploty v přívodním a vratném potrubí [°C], a

hodnoty uložené v paměti přístroje za předchozí období. Teplotní rozsah přístroje je 5 až 90 °C a maximální průtok senzorem je 5 [m³/h]. Údaje je možné vyčítat prostřednictvím sběrnice M-Bus, kde jsou aktualizované jednou za minutu. Přístroj je zobrazen na obrázku 2.10. Pro měření



Obrázek 2.10.: Landis+Gyr ULTRAHEAT/ULTRACOLD T230

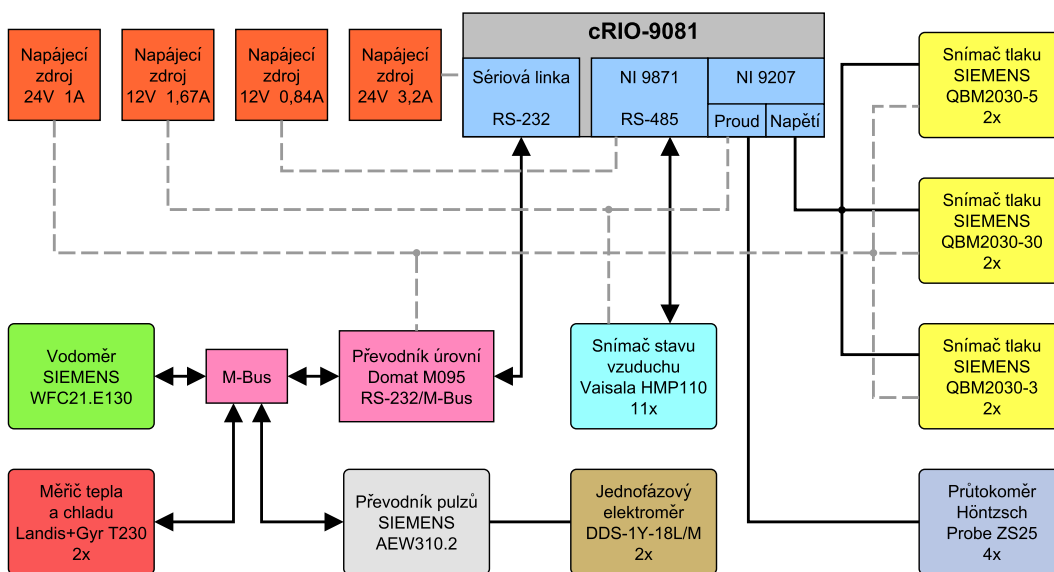
spotřeby elektrické energie je využito elektroměrů DDS-1Y-18L/M. Jsou to jednofázové elektroměry s pulzním výstupem, kde délka impulzu je 90 ms, a měří s maximální chybou 1%. Pulzní výstup je řešen jako solid-state relé, které spíná vždy, když je spotřebována jedna Wh. K elektroměrům je připojen převodník impulzů Siemens AEW310.2. Tento převodník dokáže zpracovat 2 impulzní výstupy a informaci spotřebě posílá po sběrnici M-Bus. Na sběrnici se chová jako dvě zařízení na dvou různých adresách. V převodníku je nastaveno s jakým zařízením pracuje proto aby mohl informaci o spotřebě zasílat přímo v daných jednotkách. V testovacím systému jsou použity elektroměry, které daný převodník nepodporuje a proto byl vybrán z podporovaných přístrojů takový, který má podobné parametry jako elektroměr DDS-1Y-18L/M. Převodník impulzů Siemens AEW310.2 je na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11.: Převodník impulzů Siemens AEW310.2

2.6. Kompletní zapojení

Blokové schéma na obrázku 2.12 zobrazuje kompletní zapojení všech senzorů včetně napájecích zdrojů. Jednotlivé senzory jsou v zaoblených blocích a v případě více senzorů stejného typu je na posledním řádku uveden i počet. Jednotlivé napájecí zdroje slouží k napájení různé části systému. Pro napájení platformy cRIO 9081 je vyhrazen napájecí zdroj 24 V 3,2 A. Další zdroj, 12 V 0,84 A, je vyhrazen pro napájení modulu NI 9871. Modul si z připojeného napájení vytvoří napěťové úrovně používané při komunikaci po sériové lince RS-485. Zdroj 12 V 1,67 A slouží k napájení snímačů stavu vzduchu a také k napájení proudových smyček na modulu NI 9207. Poslední z napájecích zdrojů, 24 V 1 A, napájí všechny snímače tlaku a převodník úrovní Domat M095.



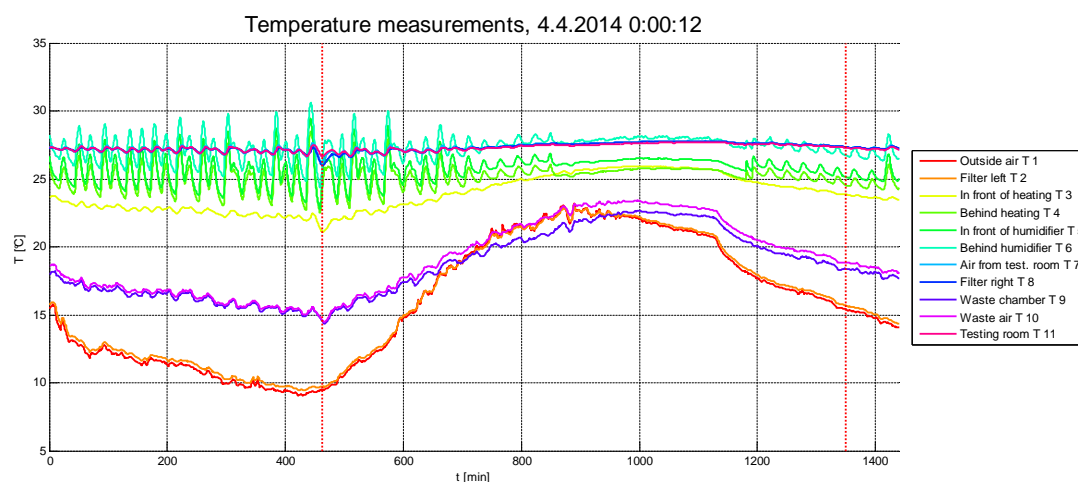
Obrázek 2.12.: Kompletní zapojení experimentálního systému

MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

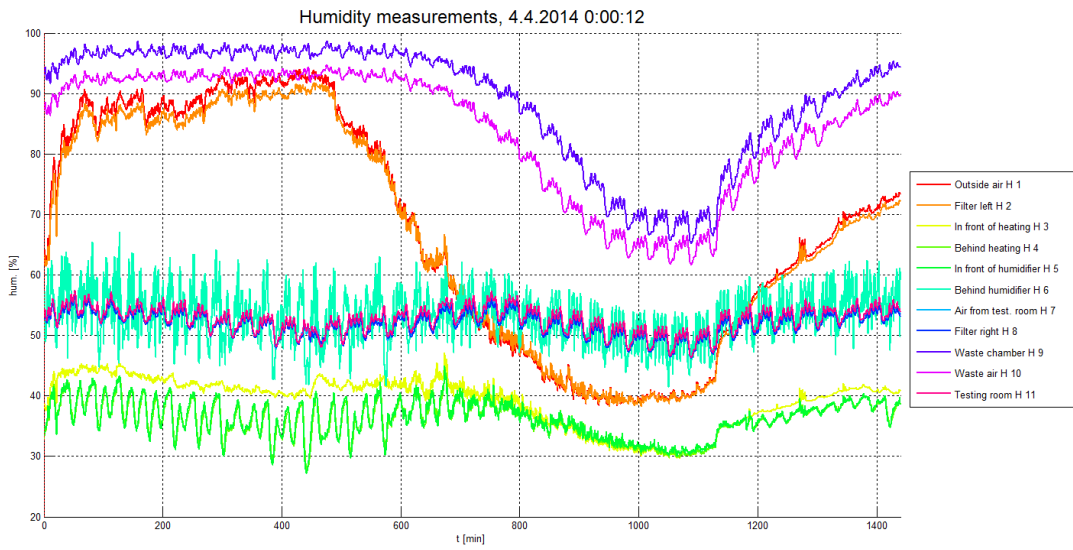
3.1. Ukázka naměřených dat

V rámci projektu byl v programu MATLAB vytvořen skript, který dokáže načíst uložená data a vizualizovat je pomocí grafů. Data jsou načtena do speciální struktury, se kterou se pak snadno pracuje při dalším zpracování. Program MATLAB je tak ideálním nástrojem pro vytváření modelů jednotky a při návrhu virtuálních senzorů.

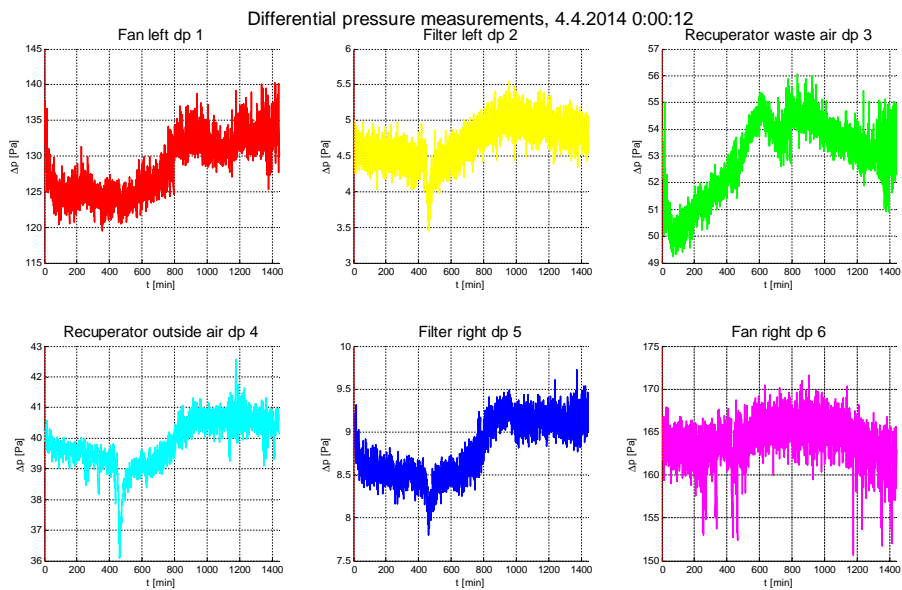
Ve skriptu je možné si vybrat data, která mají být načtena, časové období, které má být zpracováno a veličiny, které mají být vykresleny. Stejně veličiny jsou vykreslovány jednak do společného grafu a pak i jednotlivě. Skript navíc umožňuje nastavit si práh, podle kterého budou do grafů přidány svíslé čáry vyznačující prudké změny měřených veličin. Ukázka některých vybraných dat, vykreslených do grafů, je na obrázcích 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4. Skript včetně návodu je umístěn na příloženém CD.



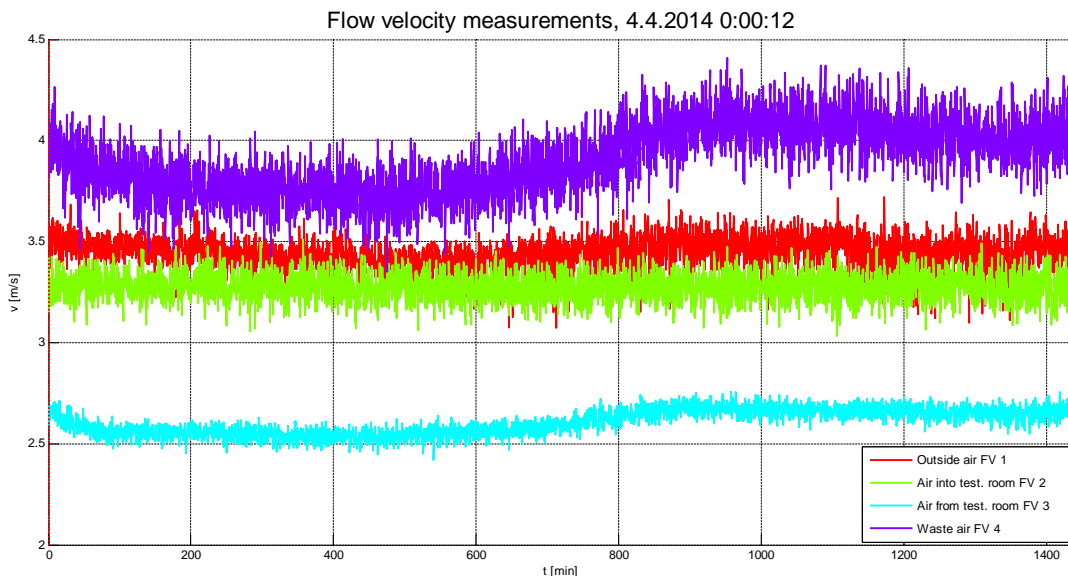
Obrázek 3.1.: Záznam vývoje teploty ze dne 4.4.2014, do jednoho grafu



Obrázek 3.2.: Záznam vývoje vlhkosti ze dne 4.4.2014, do jednoho grafu



Obrázek 3.3.: Záznam vývoje rozdílového tlaku ze dne 4.4.2014, do jednotlivých grafů



Obrázek 3.4.: Záznam vývoje rychlosti proudění vzduchu ze dne 4.4.2014, do jednoho grafu

3.2. Příklady simulovaných závad

Experimentální jednotka umožňuje simulaci různých závad typických pro HVAC jednotky, jako je například ucpání filtru nebo zaseknutí klapky. Vzhledem k tomu, že většina jednotek není vybavena dostatečným množstvím senzorů, které by pomohly danou závadu odhalit, může docházet k neefektivnímu řízení a zvýšení spotřeby energie. Díky naší experimentální jednotce je možné konkrétní závady simulovat a sledovat chování jednotky. Na základě naměřených dat mohou být navrženy FDD metody, které v kombinaci s virtuálními senzory mohou přispět k včasnému odhalení závad a efektivnímu řízení jednotky[2].

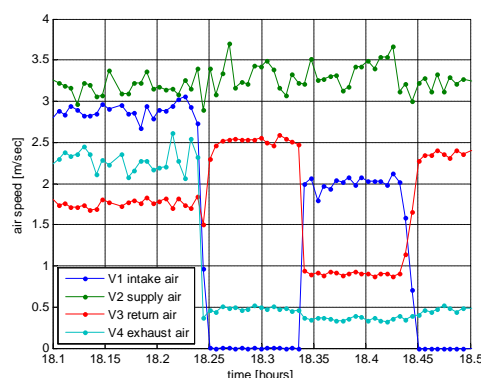
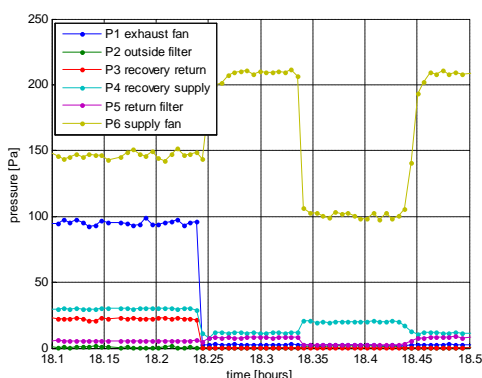
3.2.1. Závada na vstupní klapce v režimu cirkulace

Tato simulovaná závada představuje situaci, kdy je jednotka z normálního provozu přepnuta do režimu cirkulace. Za normálních okolností by došlo k úplnému uzavření vstupní klapky a úplnému přepnutí směšovací klapky. V tomto režimu jednotka nenasává žádný vzduch z venku a nechává pouze cirkulovat vzduch uvnitř budovy.

Závada byla simulována tak, že nejprve byla jednotka z normálního provozu přepnuta do režimu cirkulace a po ustálení přechodových dějů byla ručně pootevřena vstupní klapka. Chování jednotky je patrné z obrázků 3.5 a 3.6. Regulátor jednotky je nastaven tak, aby udržoval konstantní tok vzduchu na výstupu z jednotky (V2 supply air). Při přechodu do režimu cirkulace

tedy vypnul ventilátor odvádějící odpadní vzduch (exhaust fan), zvýšil výkon na přívodním ventilátoru (supply fan), uzavřel vstupní klapku a otevřel klapku směšovací.

Ve chvíli, kdy byla vstupní klapka ručně otevřena, je možné pozorovat snížení výkonu přívodního ventilátoru (snížení výkonu se projevuje poklesem tlaku), protože nasává současně i venkovní vzduch. Protože je přívodní potrubí z venku kratší, je pro ventilátor snazší sát více venkovního vzduchu než vzduchu z místnosti. Tato závada není při běžném provozu pro uživatele nacházejícího se uvnitř klimatizované místnosti pozorovatelná, ale může kvůli ní dojít ke zvýšení spotřeby jednotky, která bude muset chladit, případně ohřívat vzduch přisávaný z venčí.



Obrázek 3.5.: Závrada na vstupní klapce: profily tlaků

Obrázek 3.6.: Závrada na vstupní klapce: profily rychlosti proudění

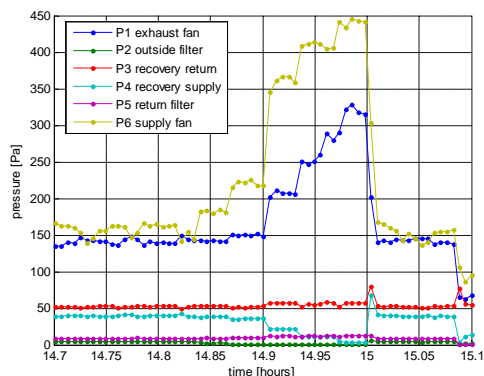
3.2.2. Ucpání přívodu vzduchu

Přívodní potrubí může být časem zaneseno listím a různými jinými předměty. Tato závada byla simulována tak, že byla postupně uzavírána vstupní klapka z 0 % do 100% uzavření. Každé 2 minuty byla klapka přivřena o 10 %. Chování jednotky je patrné z obrázků 3.7 a 3.6.

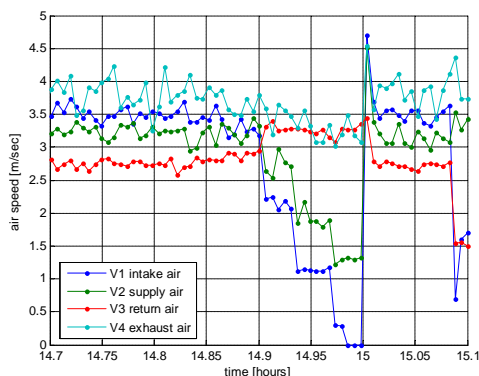
Až do 50 % (čas 14.83) uzavření vstupní klapky se simulované zanesení nějak výrazně neprojevilo. Odtud dále je vidět postupné zvyšování výkonu a tím i spotřeby na přívodním ventilátoru (projevuje se zvyšováním tlaku). Do této chvíle není závada pro uživatele v místnosti pozorovatelná. Od 70 % (14.9) dále je vidět i postupné klesání proudu vzduchu do místnosti, kterého by mohlo být uživatelem v místnosti detekováno.

3.3. Demonstrace FDD metody

Z předchozích dvou simulovaných závad vyplynulo, že by bylo možné obě detekovat sledováním diferenčního tlaku na přívodním ventilátoru. Pro demonstraci FDD metody, která by tuto



Obrázek 3.7.: Ucpání přívodu vzduchu: profily tlaků



Obrázek 3.8.: Ucpání přívodu vzduchu: profily rychlosti proudění

chybu odhalila, byl napsán jednoduchý skript (skript se nachází v příloze B a zároveň je včetně testovacích dat uložen na přiloženém CD) v programu MATLAB.

Tento skript funguje na principu, který se podobá metodě zvané APAR (AHU Performance Assessment Rules - pravidla pro posouzení výkonnosti ventilačních jednotek). Metoda APAR má pro jednotlivé módy, ve kterých může jednotka pracovat, přiřazená konkrétní pravidla. Na základě těchto pravidel se pak rozhoduje, zda se měřené veličiny nachází v požadovaných mezích[10]. Příklady některých pravidel jsou v tabulce.

Mód	Číslo pravidla	Podmínka (splnění podmínky poukazuje na výskyt chyby)
Ohřev (mód 1)	1	$T_{sa} < T_{ma} + \Delta T_{sf} - \epsilon_t$
Chlazení venkovním vzduchem (mód 2)	7	$ T_{sa} - \Delta T_{sf} - T_{ma} > \epsilon_t$
Pro všechny režimy chodu (mód 1,2,...)	26	$T_{ma} < \min(T_{ra}, T_{oa}) - \epsilon_t$

Tabulka 3.1.: Příklady pravidel metody APAR[10]

Kde:

T_{sa} - Teplota přiváděného vzduchu

T_{ma} - Teplota směřovaného vzduchu

ΔT_{sf} - Přírůstek teploty na přívodním ventilátoru

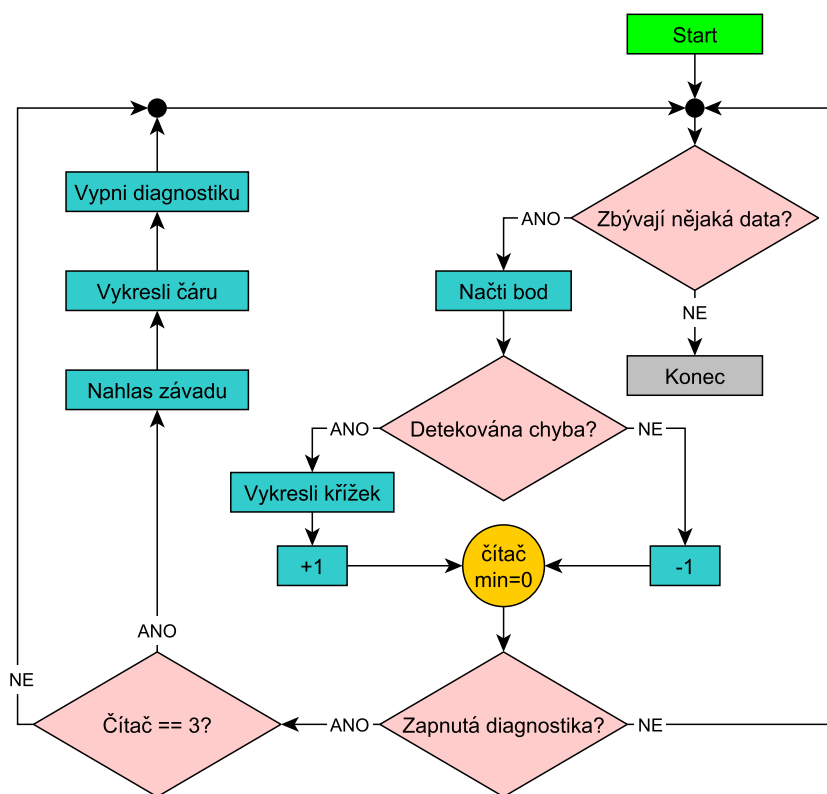
T_{ra} - Teplota odváděného vzduchu

T_{oa} - Teplota venkovního vzduchu

ϵ_t - Práh teploty značící chybu

Navržený skript FDD metody byl aplikován na chybu simulovanou v kapitole 3.2.2. Vzhledem k tomu, že v současné době systém pro sběr dat ještě nemá k dispozici informaci o, tom v jakém módu se jednotka nachází, byl demonstrační skript navrhnout na mód, při kterém byla

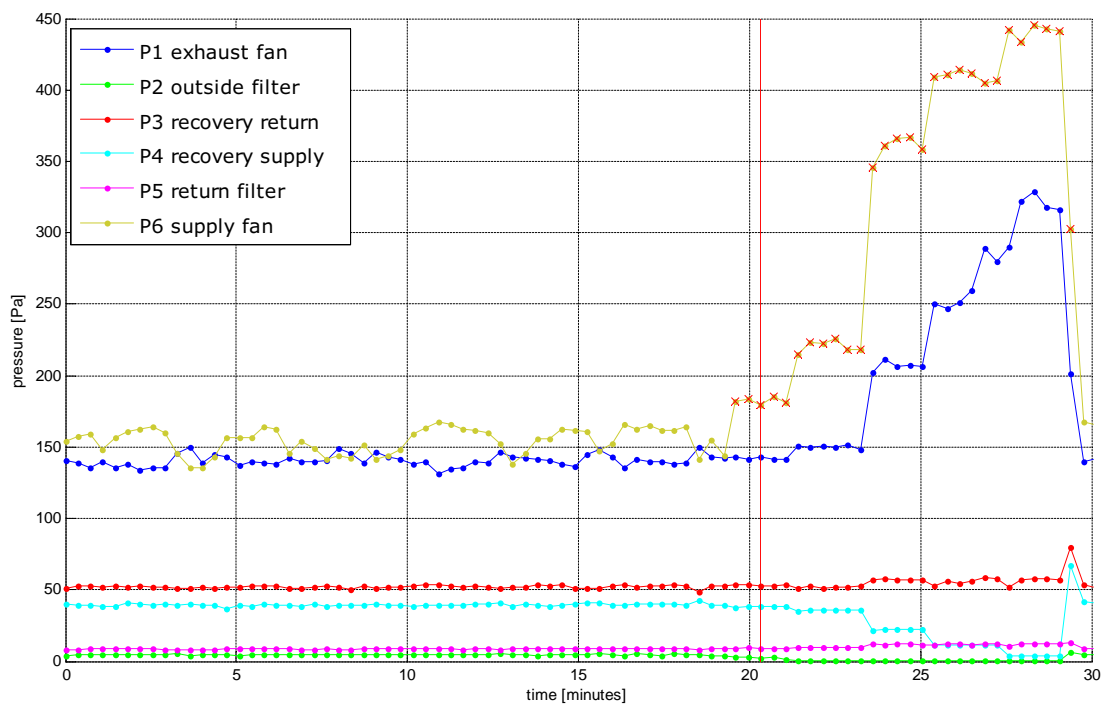
chyba simulována. Skript se skládá ze smyčky, která postupně prochází naměřená data, hledá v nich chyby a nalezené chyby podrobí diagnostice. Chyba je definována jako hodnota, která se liší od standartní (průměrné) hodnoty. Pokročilejší FDD metody by k definování průměrné hodnoty využívaly data z historie provozu jednotky. Pro demonstraci FDD metody byla standartní hodnota získána z dat, která byla naměřena ještě předtím, než byla závada simulována (úvodních 10 minut sekvence). Z této sady dat je vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Detekce chyby používá průměrnou hodnotu jako výchozí veličinu a rozšířenou směrodatnou odchylku (dvojnásobek směrodatné odchylky) jako, práh pro vytvoření mezí okolo průměrné hodnoty. Data nacházející se v této oblasti jsou identifikována jako normální a data mimo tuto mez označeny jako chyba. Diagnostika kontroluje, jak často se chyby vyskytují. Při detekci chyby je k čítači chyb přičtena jednička. Ve chvíli, kdy čítač dosáhne hodnoty = 3, je stav vyhodnocen jako závada jednotky. Pokud aktuální hodnota chybná není, od čítače se odečte jednička. Minimální hodnota čítače je 0. Diagram popisující FDD metodu je na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9.: Diagram FDD metody

Skript dále obsahuje příkazy pro vykreslení grafu naměřených hodnot. Do grafu jsou červeným křížkem vyznačena data, u kterých byla detekována chyba. V čase, kdy byly chyby vyhodnoceny jako závada, je do grafu doplněna svislá červená čára, na terminál je vypsáno hlášení

o chybě a diagnostika je pozastavena. Výsledný graf je na obrázku 3.10. Skript byl aplikován pouze na data ze senzoru umístěném na přívodním ventilátoru. Pro názornost jsou do grafu vykresleny i ostatní průběhy ze senzorů měřících rozdílový tlak.



Obrázek 3.10.: Detekce poruchy FDD metodou

PLÁNOVANÁ ROZŠÍŘENÍ

Projekt do budoucna počítá s dalším rozšířením sensorové sítě. V současné době se již pracuje na podsystému, který bude odhadovat úhel natočení klapky. Další rozšíření, jako například měření úhlu natočení klapky a měření otáček jednotlivých ventilátorů jsou v plánu.

4.1. Odhad úhlu natočení klapky

HVAC jednotka je řízena regulátorem, který natáčí klapky v různých režimech chodu jednotky do požadovaných úhlů. Regulátor ale nemá k dispozici žádnou zpětnou vazbu, aby zjistil, zda se klapky natočili do správné polohy nebo jestli se vůbec pohnuly. Natáčení klapky je řešeno na základě měření času, kdy je servomotor, který pohybuje s klapkou, připojen na napájení. Pokud je vyžadována změna úhlu natočení klapky, řídicí jednotka zpravidla otočí klapku do nějaké krajní polohy, odkud pak natáčí klapku do polohy požadované. Pokud by došlo k zaseknutí klapky v nějaké poloze, řídicí jednotka tuto závadu nedokáže detekovat a může tak kvůli ní docházet k nesprávnému chodu HVAC jednotky.

Jako zajímavé se jeví sledovat polohu, ve které se podle řídicí jednotky nachází jednotlivé klapky. Z tohoto důvodu byl navržen podsystém, který danou polohu odhaduje. Z řídicí jednotky byly vyvedeny vodiče, které jsou v ní připojeny na relé spínající napájení k servomotorům. Řídicí vstupy relé jsou přes vyvedené vodiče a dělič napětí připojeny k digitálním vstupům mikrokontroléru. Mikrokontrolér měří dobu sepnutí jednotlivých relé a na základě naměřených časů odhaduje polohu klapky stejným způsobem, jako to dělá řídicí jednotka. Platforma Compact RIO komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sériové linky RS-485 podobně jako se senzory měřící stavu vzduchu. Mikrokontrolér má na sběrnici přidělenou unikátní adresu a odpovídá pouze na dotaz adresován jemu. Platformě Compact RIO pak vrací informaci o předpokládaném úhlu natočení jednotlivých klapky. I přesto, že tento podsystém bude připojen na jinou linku, než na kterou jsou připojeny senzory měřící stav vzduchu, jsou mu pro jednoduchost nastaveny shodné

komunikační parametry. V současné době je zbývá vyladit samotnou komunikaci a nastavit mikrokontroléru správné konstanty pro co nejpřesnější odhad.

4.2. Měření úhlu natočení klappek

Jako další rozšíření experimentálního systému je v plánu měření skutečného úhlu natočení klappek. S největší pravděpodobností bude úhel natočení měřen pomocí potenciometru přidělaného přímo na hřídel, na které se nachází samotná klapka. Potenciometr bude připojen jako dělič napětí a napětí odpovídající úhlu natočení bude měřeno jedním z modulů na platformě Compact RIO.

4.3. Měření otáček ventilátorů

Další z plánovaných rozšíření systému bude přidání senzorů měřících otáčky ventilátorů. V současnosti je možné odhadovat výkon ventilátorů ze senzorů rozdílových tlaků, z rychlosti proudění vzduchu a ze spotřeby elektrické energie. Informace o aktuálních otáčkách každého ventilátoru zvlášť se jeví jako velmi zajímavá. Otázkou zůstává, jakým způsobem otáčky měřit. Vzhledem ke špatné přístupnosti ventilátorů se zvažuje i možnost využít bezdrátových otáčkoměrů.

4.4. Další možnosti rozšíření

Experimentální systém je připraven pro další rozšíření. K dispozici jsou nevyužité vstupy jednotlivých modulů. Konkrétně 4x proudová smyčka a 2x napěťový vstup na modulu NI 9207, volné porty sériové linky na modulu NI 9871 a volné napěťové vstupy modulu NI9205.

V současné době je na modulu NI 9871 využíván pouze jeden slot sériové linky, ke kterému jsou připojeny senzory měřící stav vzduchu. Počítá se s tím, že druhý slot bude využit pro připojení podsystému, který odhaduje úhel natočení klappek. Vzhledem k tomu, že to bude jediné zařízení na této lince, předpokládá se, že se sem budou připojovat další podsystémy komunikující stejným způsobem.

Systém bude dále rozšiřován v oblasti získávání informací přímo z řídicí desky HVAC jednotky. Kromě řídicích signálů se zde nachází i informace z originálních senzorů, zabudovaných do systému přímo od výrobce, které slouží k samotnému řízení jednotky.

ZÁVĚR

V této práci byl představen systém pro sběr dat z experimentální HVAC jednotky. Jako ústřední prvek systému byla použita platforma Compact RIO-9081 s přídatnými moduly NI 9207 a NI 9801. Modulu NI 9207 slouží k získávání dat ze senzorů s napěťovým výstupem a proudovou smyčkou. Jedná se o senzory měřící rozdílové tlaky a rychlost proudění vzduchu. Modul NI 9801 zajišťuje komunikaci se senzory měřícími teplotu a relativní vlhkost vzduchu, prostřednictvím sériové linky RS-485. Zbylé senzory využívající sběrnici M-Bus, která je k systému připojena přes převodník úrovní Domat M095 a sériový port RS-232.

Ke sběru dat byl vytvořen program v grafickém prostředí LabVIEW. Po spuštění měření program postupně projde senzory na všech periferiích a získá z nich data. Data jsou pak zpracována a jsou z nich dopočítány další užitečné veličiny. Program následně vizualizuje naměřená data do grafů, tabulek a schématu klimatizační jednotky. Po nastavené časové periodě jsou data ukládána do textového souboru na disk. K uloženým datům byl vytvořen vzdálený přístup přes internet s využitím programu Google drive a jsou tak připravena k dalšímu zpracování.

Na experimentálním systému byly simulovány dvě závady typické pro HVAC jednotky. Data naměřená při simulaci jedné ze závad posloužila k demonstraci využití Fault detection and diagnostics (FDD) metody k odhalení závady na jednotce. Pro odhalení závady byl vytvořen jednoduchý skript, který prochází naměřená data a hledá v nich hodnoty, které se odchylují od standardních hodnot v daném režimu chodu jednotky. Takovéto odchylky jsou identifikovány jako chyba a skript posuzuje četnost výskytu těchto chyb. Pokud četnost výskytu překročí danou mez, je to vyhodnoceno jako závada na jednotce.

V práci je pojednáno i o problematice virtuálních senzorů. Experimentální systém byl navržen tak, aby na základě naměřených dat mohl být vytvořen matematický model jednotky. Model pak jednotky poslouží k návrhu virtuálních senzorů a jejich aplikaci na FDD metody.

Práce pojednává i o budoucnosti projektu a o dalších rozšířeních, která jsou v současné době v plánu.

LITERATURA

- [1] Katalog větracích jednotek. *Atrea* [online]. březen 2007 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.atrea.cz/img/jednotky/katalog_vetracich_jednotek/
- [2] Gerhard Zimmermann , Yan Lu & George Lo (2012): Automatic HVAC fault detection and diagnosis system generation based on heat flow models, *HVAC&R Research*, 18:1-2, 112-125
- [3] PÉREZ-LOMBARD, Luis, José ORTIZ a Christine POUT. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 2008, vol. 40, issue 3, s. 394-398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778807001016>
- [4] KATIPAMULA, Srinivas a Michael BRAMBLEY. Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I. *HVAC*. 2005-1-1, vol. 11, issue 1, s. 3-25. DOI: 10.1080/10789669.2005.10391123. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2005.10391123>
- [5] KATIPAMULA, Srinivas a Michael BRAMBLEY. Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part II. *HVAC*. 2005-4-1, vol. 11, issue 2, s.169-187. DOI: 10.1080/10789669.2005.10391133. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2005.10391133>
- [6] N.S. Castro, J. Schein, C. Park, M.A. Galler, S.T. Bushby, J.M. House, Results from simulation and laboratory testing of air handling unit and variable air volume box diagnostic tools, *NISTIR 6964*, National Institute of Standards and Technology, 2003
- [7] PITA, Edward G. *Air conditioning principles and systems*. 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2002, xv, 524 p. ISBN 01-309-2872-0.

- [8] MOSER, Dave. Commissioning Existing Airside Economizer Systems. *ASHRAE Journal*. March 2013
- [9] TROJANOVA J., VASS J., MACEK K., ROJICEK J. and STLUKA P., *Fault Diagnosis of Air Handling Units*, 7th IFAC International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, 2009
- [10] FREY, Donald a Vernon SMITH. Advanced automated HVAC Fault detection and diagnostics commercialization program. *Energy Research and Development Division FINAL PROJECT REPORT*. 2008, 500-03-030
- [11] PLOENNIGS, Joern, Ammar AHMED, Burkhard HENSEL, Paul STACK a Karsten MENZEL. Virtual sensors for estimation of energy consumption and thermal comfort in buildings with underfloor heating. *Advanced Engineering Informatics*. 2011, vol. 25, issue 4, s. 688-698. DOI: 10.1016/j.aei.2011.07.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034611000528>

Přílohy

TABULKA INDEXŮ HODNOT

V tabulce jsou uvedeny pozice, na kterých se v textovém souboru nachází naměřené veličiny z jednotlivých senzorů.

č. údaje	senzor	parametr	č. údaje	senzor	parametr
1	-	datum	51		9 teplota
2	-	čas	52		9 vlhkost
3	1	teplota	53		9 rosný bod
4	1	vlhkost	54		9 měrná vlhkost vzduchu
5	1	rosný bod	55		9 měrná entalpie
6	1	měrná vlhkost vzduchu	56		9 měrná hmotnost
7	1	měrná entalpie	57		10 teplota
8	1	měrná hmotnost	58		10 vlhkost
9	2	teplota	59		10 rosný bod
10	2	vlhkost	60		10 měrná vlhkost vzduchu
11	2	rosný bod	61		10 měrná entalpie
12	2	měrná vlhkost vzduchu	62		10 měrná hmotnost
13	2	měrná entalpie	63		11 teplota
14	2	měrná hmotnost	64		11 vlhkost
15	3	teplota	65		11 rosný bod
16	3	vlhkost	66		11 měrná vlhkost vzduchu
17	3	rosný bod	67		11 měrná entalpie
18	3	měrná vlhkost vzduchu	68		11 měrná hmotnost
19	3	měrná entalpie	69	anemometr 1	rychlost proudění
20	3	měrná hmotnost	70	anemometr 1	průtok vzduchu
21	4	teplota	71	anemometr 2	rychlost proudění
22	4	vlhkost	72	anemometr 2	průtok vzduchu
23	4	rosný bod	73	anemometr 3	rychlost proudění
24	4	měrná vlhkost vzduchu	74	anemometr 3	průtok vzduchu
25	4	měrná entalpie	75	anemometr 4	rychlost proudění
26	4	měrná hmotnost	76	anemometr 4	průtok vzduchu
27	5	teplota	77	dp1	rozdíl tlaku
28	5	vlhkost	78	dp2	rozdíl tlaku
29	5	rosný bod	79	dp3	rozdíl tlaku
30	5	měrná vlhkost vzduchu	80	dp4	rozdíl tlaku
31	5	měrná entalpie	81	dp5	rozdíl tlaku
32	5	měrná hmotnost	82	dp6	rozdíl tlaku
33	6	teplota	83	-	Aktuální účinnost ZZT
34	6	vlhkost	84	-	výkon ohříváče/chladiče
35	6	rosný bod	85	-	zvlhčovací výkon
36	6	měrná vlhkost vzduchu	86	-	změna teploty
37	6	měrná entalpie	87	-	změna teploty
38	6	měrná hmotnost	88	-	Ohřev vzduchu ventil.
39	7	teplota	89	-	Ohřev vzduchu ventil.
40	7	vlhkost	90	K1-E	energie
41	7	rosný bod	91	K1-T-flow	teplota
42	7	měrná vlhkost vzduchu	92	K1-T-ret	teplota
43	7	měrná entalpie	93	K1-vol	objem
44	7	měrná hmotnost	94	K2-E	energie
45	8	teplota	95	K2-T-flow	teplota
46	8	vlhkost	96	K2-T-ret	teplota
47	8	rosný bod	97	K2-vol	objem
48	8	měrná vlhkost vzduchu	98	W1	měření spotřeby vody
49	8	měrná entalpie	99	E1	měření spot. el. energie
50	8	měrná hmotnost	100	E2	měření spot. el. energie

Tabulka A.1.: Indexy hodnot v textovém souboru

KÓD SKRIPTU FDD METODY

```
clc
fig=figure;
hax=axes;
hold on
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp1,'b.-','MarkerSize',13)
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp2,'g.-','MarkerSize',13)
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp3,'r.-','MarkerSize',13)
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp4,'c.-','MarkerSize',13)
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp5,'m.-','MarkerSize',13)
plot(Test.Time,Test.DiffP.dp6,'.-','Color',[0.8 0.8 0.2],'MarkerSize',13)
grid on
legend('P1 exhaust fan','P2 outside filter','P3 recovery return',...
      'P4 recovery supply','P5 return filter','P6 supply fan',...
      'location','NorthWest');
xlabel('time [minutes]');
ylabel('pressure [Pa]');
axis([0,30,0,450]);
%%
%prumerna hodnota z dat bez chybného provozu
dp6Mean = mean(Test.DiffP.dp6(1:28));
%smernodatna odchylka z dat bez chybného provozu
dp6Std = std(Test.DiffP.dp6(1:28));
%%
i=1;
counter=0;
diag=1;
error=0;
common = dp6Mean; %bezna hodnota
```

```
limit=2*dp6Std; %krajni mez
while (i<=length(Test.Time))
    %testovani - detekuje chybu
    if(Test.DiffP.dp6(i) > (common + limit) || ...
        Test.DiffP.dp6(i) < (common - limit))
        error=1;
        %vykresli cerveny krizek
        plot(Test.Time(i),Test.DiffP.dp6(i),'rx','MarkerSize',8)
    end
    %diagnostika
    if(diag==1) %kontoruluje zda probiha diagnostika
        if(error==1) %zapocitava detekovane chyby
            counter = counter +1;
        else
            counter = counter -1;
        end
        if(counter<0) %nulovani counteru
            counter=0;
        end
        if(counter==3) %detekce poruchy
            %vypis na terminal
            disp(sprintf('Detekovana zavada v case %d!',...
                Test.Time(i)));
            %vykresleni cary
            line([Test.Time(i) Test.Time(i)],get(hax,'YLim'),...
                0'Color',[1 0 0])
            %vypne diagnostiku
            diag=0;
        end
    end
    i = i+1;
    error=0;
end
```

FOTKY EXPERIMENTÁLNÍ HVAC JEDNOTKY



Obrázek C.1.: Pohled a experimentální HVAC jednotku



Obrázek C.2.: Pohled na pracoviště experimentální HVAC jednotky



Obrázek C.3.: Otevřená HVAC jednotka

OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

DP - Diplomová práce + zadání diplomové práce

FDD Skript - Skript FDD metody včetně testovacích dat

Foto - Fotografie jednotky

Poster - Text, který vznikl k Posteru 2014

Program - Poslední verze programu pro vyčítání dat (LabVIEW)

Vykreslovací Skript - Skript pro vykreslování dat do grafů, včetně návodu

